

Estratigrafía secuencial de sistemas deltaicos en cuencas de antepaís: ejemplos de Sant Llorenç del Munt, Montserrat y Roda (Paleógeno: cuenca de antepaís surpirenaica)

Miguel López Blanco

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

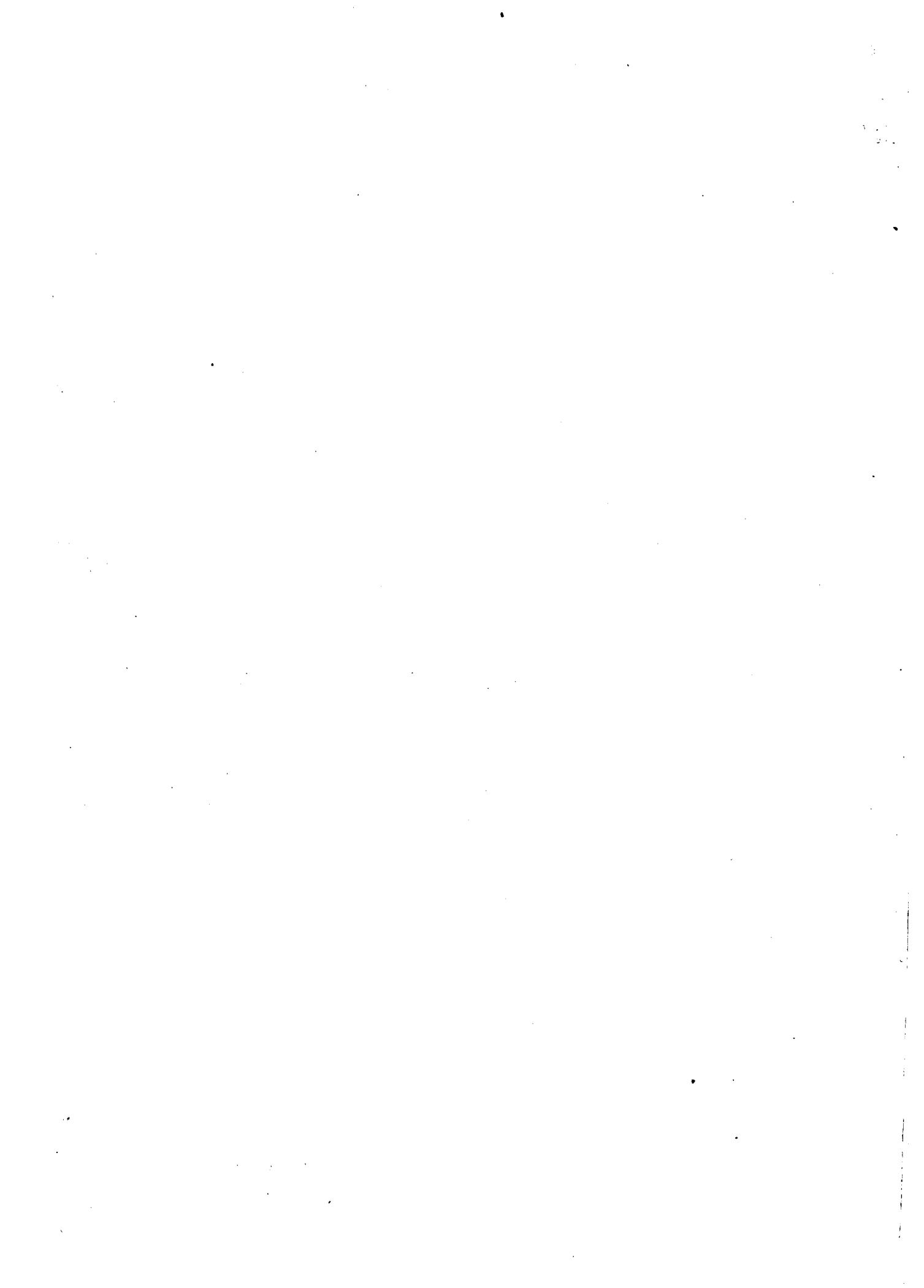
ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL
DE SISTEMAS DELTAICOS
EN CUENCAS DE ANTEPAIS:
EJEMPLOS DE SANT LLORENÇ
DEL MUNT, MONTSERRAT Y RODA
(PALEOGENO, CUENCA DE ANTEPAIS
SURPIRENAICA)



Miguel LÓPEZ BLANCO
Junio de 1996



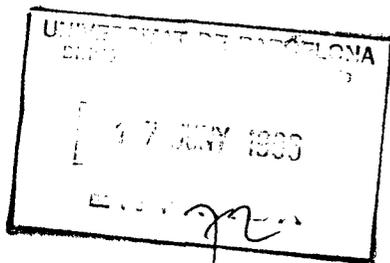
Universitat de Barcelona
Departament de Geologia Dinàmica,
Geofísica i Paleontologia





UNIVERSITAT DE BARCELONA

Departament de Geologia Dinàmica,
Geofísica i Paleontologia



Facultat de Geologia
Zona Universitària de Pedralbes
Tel. 402 13 76
Fax 402 13 40
08071 Barcelona

ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL DE SISTEMAS DELTAICOS EN CUENCAS DE ANTEPAIS: EJEMPLOS DE SANT LLORENÇ DEL MUNT, MONTSERRAT Y RODA (Paleógeno, cuenca de antepaís surpirenaica)

Memoria realizada por Miguel LÓPEZ BLANCO en el
Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la
Facultad de Geologia de la Universidad de Barcelona, dirigida por los
doctores Mariano Marzo Carpio, del mencionado departamento y
Luís Pomar Goma del Departament de Ciències de la Terra de la
Universitat de les Illes Balears, para optar al grado de Doctor en
Geología.

Barcelona, Junio de 1996

Los directores:

Mariano Marzo Carpio

Luis Pomar Goma

El doctorando, Miguel López Blanco

2

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis ha sido realizada al amparo de una beca de Formación del Profesorado Universitario del Ministerio de Educación y Ciencia (1992-1995) y una beca de Colaboración Docente en El Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia (1996).

Además de por estas becas, los estudios realizados fueron en parte subvencionados por:

- ELF-Aquitaine y la Comunidad Económica Europea: Proyecto JOUF 0034 (1989-1991).

- Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya: Proyectos nº 1451 y 1369, de la Fundació Bosch i Gimpera de la Universitat de Barcelona (1991-1992).

- Dirección General de Investigación Científica y técnica: Proyectos nº PB91-0801 y nº PB91-0805 (1992-1995)

- Comunidad Económica Europea: Proyecto nº JOU-CT92-0110 (1993-1995).

Además de a las fuentes de financiación diversas, quiero dar las gracias a mis directores de tesis, Mariano Marzo Carpio, del Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la Facultat de Geologia de la Universidad de Barcelona y Luís Pomar Goma, del Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears, por acceder a dirigir esta tesis y... por todo lo agradecer que se suele agradecer en estos casos.

También quiero dar las gracias a los doctores Ronald Steel, del Department of Geology, de la Universidad de Wyoming (E.E.U.U); Cai Puigdefàbregas i Tomás, investigador del Norsk-Hydro Research Center (Noruega); Francesc Calvet i Rovira, y Ramón Salas, del Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, de la Universitat de Barcelona; Josep Serra i Kiel, Salvador Reguant i Serra, y Miquel Canals i Artigas, del Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia, de la Universitat de Barcelona, por haber accedido amablemente a formar parte del tribunal que juzgará esta tesis.

No cuenten nada a nadie.
En el momento en que uno cuenta
cualquier cosa, empieza a
echar de menos a todo el mundo.

J. D. Salinger,
"El guardien entre el centeno"
(The catcher in the rye -1945-)

Letras en la arena,
la mar serena.
La Buena Vida,
"por la mañana"

ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL DE SISTEMAS DELTAICOS EN CUENCAS DE ANTEPAIS: EJEMPLOS DE SANT LLORENÇ DEL MUNT, MONTSERRAT Y RODA
(Paleógeno, cuenca de antepaís surpirenaica)

PARTE I

CAPITULO I: INTRODUCCION

1)INTRODUCCION.....	1
Los modelos del grupo Exxon.....	3
Secuencias regresivo-transgresivas.....	8
Secuencias transgresivo-regresivas.....	10
2)OBJETIVOS.....	13
3)METODOLOGIA DE TRABAJO.....	14
4)PRESENTACION DE LA MEMORIA.....	16

PARTE II

CAPITULO II: SANT LLORENÇ DEL MUNT Y MONTSERRAT

1)SITUACION GEOGRAFICA.....	17
2)ENCUADRE GEOLOGICO.....	17
2.1)Tectónica regional.....	17
2.2)El margen SE de la cuenca del Ebro.....	22
2.2.1)Estratigrafía regional del Paleógeno de Montserrat y Sant Llorenç del Munt.....	23
1)Litoestratigrafía.....	23
2)Cronoestratigrafía.....	24
2.2.2)Tectónica del margen de la cuenca (Cadena Prelitoral).....	27
1)Estructura del autóctono y parautóctono.....	28
2)Estructura del alóctono.....	32
3)Acortamiento.....	33
2.2.3)Relaciones tectónica-sedimentación y cronología de las estructuras.....	34
2.2.4)Historia de la subsidencia.....	37
2.3)Paleoclimatología de la zona durante el Paleógeno.....	38

3)ANALISIS DE FACIES.....	43
3.1)Facies terrígenas.....	43
3.1.1)Abanico aluvial.....	43
1)Abanico aluvial proximal.....	44
2)Abanico aluvial distal-Llanura de abanico costero.....	45
3.1.2)Abanico costero.....	46
1)Llanura de abanico costero.....	46
2)Frente deltaico-"Nearshore".....	46
3)Talud deltaico-"Offshore".....	48
3.2)Facies carbonáticas.....	49
3.2.1)Plataforma carbonática.....	49
1)Barra bioclástica.....	50
2)Facies arrecifales.....	50
4)SECUENCIALIDAD.....	52
4.1)Introducción.....	52
4.2)Subdivisión estratigráfica.....	53
4.2.1)Estratigrafía del abanico costero.....	53
1)Secuencias fundamentales.....	53
2)Secuencias compuestas.....	61
3)Megasecuencias compuestas.....	67
4)Relación con areas vecinas.....	70
4.2.2)Estratigrafia del abanico aluvial.....	73
1)Facies.....	73
2)Secuencialidad.....	74
4.3)Discusión.....	78
Megasecuencia compuesta.....	80
Secuencias compuestas.....	84
Secuencias fundamentales.....	88
5)CONCLUSIONES.....	90
6)SUMMARY.....	93

CAPITULO III: LA ARENISCA DE RODA

1)SITUACION GEOGRAGICA.....	97
2)ENCUADRE GEOLOGICO.....	97
2.1)Los Pirineos.....	97
2.1.1)La unidad surpirenaica central.....	101
2.1.2)Desarrollo de la cuenca de antepaís.....	105
3)ESTRATIGRAFIA.....	110
3.1)Marco estratigráfico.....	110
3.2)Cronoestratigrafía.....	117
4)ANALISIS DE FACIES.....	119
4.1)Facies aluviales y de llanura deltaica.....	120
4.2)Facies lagunares o de bahía.....	123
4.3)Facies de frente deltaico-"Nearshore".....	125
4.3.1)Facies de frente deltaico progradante.....	125
1)Frente deltaico"tipo Codoñeras".....	126
2)Frente deltaico "tipo Roda".....	128
4.3.2)Facies de abandono de frente deltaico.....	131
4.4)Barras submareales-"Sandwaves".....	132
4.5)Prodelta-"Offshore".....	133
4.6)Plataforma carbonática.....	133
5)SECUENCIALIDAD.....	134
5.1)Introducción.....	134
5.2)Secuencias fundamentales.....	138
5.2.1)Secuencias fundamentales "tipo Codoñeras".....	139
5.2.2)Secuencias fundamentales "tipo X".....	139
5.2.3)Secuencias fundamentales "tipo Y".....	149
5.2.4)Secuencias fundamentales "tipo Z".....	152
5.3)Secuencias compuestas.....	152
5.4)Megasecuencias compuestas.....	156
5.5)Discusión.....	157
6)RELACIONES ENTRE LA SEDIMENTACION Y LA ACTIVIDAD TECTONICA.....	160
6.1)Estructura local.....	160
6.2)Influencia de la tectónica en la sedimentación de la Arenisca de Roda.....	161
7)CONCLUSIONES.....	176
8)SUMMARY.....	176

PARTE III

CAPITULO IV: DISCUSION

1)VALIDEZ DE LA ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL COMO METODO DE CORRELACION.....	183
2)CONSIDERACIONES METODOLOGICAS GENERALES SOBRE LA ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL.....	184
3)DISCRIMINACION DE LOS FACTORES DE CONTROL.....	187
4)LOS DIFERENTES MODELOS DE ESTRATIGRAFIA SECUENCIAL: VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	190
4.1)Ventajas de la utilización de cada uno de los diferentes modelos.....	190
4.1.1)Ventajas de la utilización del modelo del grupo Exxon.....	190
4.1.2)Ventajas de la utilización del modelo de las secuencias estratigráficas genéticas.....	190
4.1.3)Ventajas de la utilización de los modelos de secuencias transgresivo-regresivas.....	191
4.2)Inconvenientes de la utilización de cada uno de los diferentes modelos.....	193
4.2.1)Problemática y dificultades generales del análisis secuencial.....	193
4.2.2)Inconvenientes de la utilización de los modelos del grupo de Exxon.....	198
4.2.3)Problemática de la utilización de los modelos de secuencias estratigráficas genéticas.....	205
4.2.4)Problemática de la utilización de los modelos de secuencias transgresivo-regresivas.....	208
5)CONSIDERACIONES FINALES.....	211
6)CONCLUSIONES.....	213
7)SUMMARY.....	218
 BIBLIOGRAFIA.....	 223

PARTE I

CAPITULO I:
INTRODUCCION

1) INTRODUCCION

La estratigrafía secuencial es una metodología útil para la subdivisión de sucesiones estratigráficas en una serie de litosomas tridimensionales formados por litofacies genéticamente relacionadas y limitadas por superficies estratigráficas de discontinuidad.

En este sentido, las unidades diferenciadas en base a estudios de estratigrafía secuencial son, en parte, similares a las Unidades Aloestratigráficas (cuerpos de rocas sedimentarias cartografiable definidos e identificados en base a las discontinuidades que las limitan; NACSN, 1983) y a las "Unconformity Bounded Units", limitadas por discontinuidades (Hedberg Ed., 1976).

La subdivisión de sucesiones sedimentarias mediante la aplicación de la metodología de la estratigrafía secuencial es una aproximación, en muchos casos, más útil que la subdivisión litoestratigráfica. Las subdivisiones basadas en dicha metodología tiene un mayor significado cronoestratigráfico que la aproximación litoestratigráfica, ya que las superficies limitantes, sin ser necesariamente totalmente isócronas, son por lo general, mucho menos diácronas que las superficies de cambios de litofacies.

La estratigrafía secuencial supone un refinamiento respecto a aproximaciones de tipo puramente aloestratigráfico, porque el establecimiento de las primeras incorpora, además del reconocimiento y trazado de las superficies limitantes, la necesidad de un análisis sedimentológico (interpretación de ambientes sedimentarios) que permite establecer cuales son las relaciones genéticas entre las litofacies.

Teóricamente, la correcta interpretación del significado de las diferentes secuencias implica conocer una serie de factores, como son los controles tectónicos y climáticos del aporte sedimentario, la historia de la subsidencia de la cuenca y de las variaciones eustáticas, así como disponer de un entramado cronoestratigráfico lo suficientemente preciso, de forma que permita la evaluación de las tasas de variacion del nivel relativo del mar y del aporte sedimentario.

La utilidad de la estratigrafía secuencial se basa en su aplicación a la exploración y explotación de recursos naturales, a dos escalas:

-análisis de la subdivisión del relleno de cuencas sedimentarias para la predicción de posibles trampas estratigráficas, y

- análisis de la organización (grado de heterogeneidad interna) de rocas almacén.

Los primeros trabajos de estratigrafía secuencial moderna se basan en estudios de estratigrafía sísmica, publicados en la Memoria n° 26 de la AAPG (Payton, 1977), en la que se incluyen los trabajos de Mitchum, 1977 y Vail et al., 1977. En éstos se desarrolla una metodología de trabajo y una terminología que se aplica principalmente al estudio de líneas sísmicas en las que la subdivisión secuencial se refleja en secuencias o ciclos de gran escala (1er, 2º, y 3er orden).

Posteriormente, la aplicación de esta metodología y terminología a los afloramientos rocosos ha conllevado un cierto refinamiento de esta metodología, dando lugar a la distinción de secuencias de mayor orden, precisión de las características sedimentológicas de las diferentes partes (cortejos, unidades, hemiciclos, "systems tracts", "sequence sets"..) y de los diferentes tipos de superficies clave y superficies limitantes de las diferentes secuencias. El trabajo de campo también ha puesto en duda algunas de las ideas o doctrinas originales de la metodología propuesta en Payton (1977).

Contrariamente a lo que se piensa, no existe un único modelo de subdivisión secuencial, a pesar de que el concepto de estratigrafía secuencial tiende a hacerse sinónimo de la metodología particular empleada por el grupo Exxon (Payton, 1977; Vail et al., 1977; Jervey, 1988; Posamentier et al., 1988; Posamentier y Vail, 1988; Van Wagoner et al., 1990; Mitchum y Van Wagoner, 1991; Vail et al., 1991 y Haq, 1991 entre otros). Así, además de la metodología empleada por este grupo se puede citar la existencia de otras, como por ejemplo: la estratigrafía genética de Galloway (1989 a y b) (basada en el trabajo de Frazier, 1974) o las secuencias Transgresivo-regresivas desarrolladas por Embry (1993).

Casi todas estos modelos de subdivisión secuencial reconocen la necesidad de ajustar dichos modelos, generalmente definidos para y aplicados en márgenes pasivos, asumiendo condiciones de aporte sedimentario y subsidencia prácticamente constantes, para regiones tectónicamente activas, como son las cuencas de antepaís, donde ni la subsidencia ni el aporte sedimentario son constantes.

Existen dos grupos de modelos: unos más basados en la interpretación y otros basados en la descripción. Los modelos más interpretativos son los del grupo Exxon, mientras que los más "descriptivos" son los propugnados por

Galloway (1989a), Embry y Johannessen (1992), Helland-Hansen y Martinsen (en prensa) o López Blanco (1993).

En la figura I.1 se muestra la relación existente entre los diferentes tipos de secuencias deposicionales y parasecuencias del grupo Exxon, las secuencias estratigráficas genéticas de Galloway (1989a), secuencias transgresivo-regresivas de Embry (1993), las secuencias definidas en este trabajo y las diferentes eventos y superficies generadas durante ciclos de subida y bajada relativa del nivel del mar.

LOS MODELOS DEL GRUPO EXXON (Secuencias Deposicionales)

La teoría de la estratigrafía secuencial del grupo Exxon se basa principalmente en los trabajos de Mitchum *et al.* (1977), Vail *et al.* (1977), Vail (1987), Van Wagoner *et al.* (1987), Posamentier y Vail (1988), Jervey (1988), Posamentier *et al.* (1988) y Mitchum y Van Wagoner (1991), Vail *et al.* (1991), Haq (1991).

Las unidades principales son las secuencias deposicionales (figura I.2), de las que existen dos tipos principales (I y II) útiles para diferentes circunstancias o contextos (ver figura I.1). Las secuencias deposicionales fueron definidas como sucesiones relativamente conformes de estratos genéticamente ligados, limitados por discordancias o sus correlativas conformidades (Mitchum *et al.*, 1977).

La ciclicidad registrada por una secuencia deposicional está supuestamente relacionada con cambios relativos del nivel del mar (o nivel de base). Se han diferenciado dos tipos diferentes de secuencias deposicionales en base a los tipos de superficies que las pueden limitar. Estas superficies estarían generadas durante diferentes momentos o períodos dentro de una bajada relativa del nivel de base. Según los citados autores, los límites de secuencia de tipo I y tipo II se forman durante las caídas del nivel del mar (figuras I.1 y I.2).

Los límites de secuencias de tipo I se generan durante períodos de exposición del borde de la plataforma (Jervey, 1988 y Posamentier *et al.*, 1988), cuando el nivel del mar cae por debajo de la ruptura de la línea de costa deposicional ("depositional shoreline break") o ruptura de "offlap" (Vail *et al.*, 1991).

Los límites de secuencia de tipo II se producen cuando el nivel del mar no baja lo suficiente como para caer bajo la ruptura de la línea de costa deposicional ("depositional shoreline break") o ruptura de "offlap" y se generan al principio de la subida del nivel de base (Jervey, 1988 y Posamentier *et al.*, 1988).

Las secuencias deposicionales están constituidas por parasecuencias (subdivisiones de menor rango observables dentro de una secuencia deposicional), que son sucesiones relativamente conformes de capas genéticamente relacionadas que dan lugar a secuencias somerizantes, limitadas por superficies de inundación marinas o sus superficies correlativas (Van Wagoner *et al.*, 1987). Las parasecuencias son las unidades fundamentales a partir de cuyo apilamiento se "construyen" las secuencias deposicionales.

Las secuencias se subdividen en cortejos sedimentarios ("systems tracts"), que son conjuntos de sistemas deposicionales contemporáneos (Brown y Fisher, 1977) formados durante los diferentes transectos de un ciclo de variación del nivel de base, y definidos por su situación dentro de la secuencia y por el tipo de apilamiento de sus parasecuencias y conjuntos de parasecuencias (figura I.2).

El cortejo de nivel del mar bajo ("lowstand systems tract"; Vail, 1987) es un conjunto de sedimentos depositados sobre una discontinuidad de tipo I, durante una fase de nivel relativo del mar bajo (caída del nivel e inicio del ascenso).

El cortejo de borde de plataforma ("shelf margin systems tract"; Vail, 1987) es el conjunto de sistemas deposicionales acumulados sobre la plataforma continental externa y el talud por encima de una discontinuidad de tipo II. Son cuerpos regresivos sigmoidales que muestran un aumento progresivo en el espesor de los "topsets".

El cortejo transgresivo ("transgressive systems tract"; Vail, 1987) es el conjunto retrogradacional de parasecuencias desarrolladas durante el ascenso relativo del nivel del mar. Se sitúa sobre la superficie transgresiva y bajo la superficie de máxima inundación.

El cortejo de nivel del mar alto ("highstand systems tract"; Vail, 1987) es el generado entre un ascenso y un descenso relativo del nivel del mar. Su base es una superficie de máxima inundación y se caracterizan por presentar dispositivos progradantes.

Figura I.1) Relación entre diferentes momentos dentro de los ciclos de variación relativa del nivel del mar, las superficies que se generan y las diferentes propuestas de subdivisión estratigráfica secuencial (modificado de Embry, 1994).

Relations among the different moments or stages of the cycles of relative sea level change, the generated surfaces and the different sequence stratigraphic models (modified after Embry, 1994).

	SECUENCIAS DEPOSICIONALES (Grupo Exxon)						SECUENCIAS DE ESTE TRABAJO
	Tipo I			Tipo II			
	Vail (1987)	Posamentier et al. (1992), Jervy (1993)	Hunt & Tucker (1992)	Vail (1987)	Parasecuencias	SECUENCIAS ESTRATIGRAFICAS GENETICAS Galloway (1989)	
1	•Hipotética línea tiempo del nivel de base	LS	Alto nivel		LPS	LS	
5	•SMI línea de costa hacia la cuenca	Transgresivo	Transgresivo			Componentes de "onlap"	
4	•ST línea de costa hacia tierra	Bajo nivel 2	Bajo nivel 2	LS			LS
3	•Hipotética línea tiempo del nivel de base	Bajo nivel 1	forced regression wedge	Alto nivel	LS	Componentes de "offlap"	LS
2	•SOT Exposición del borde de la plataforma	LS	LS				Regresivo
1	•Hipotética línea tiempo del nivel de base	Alto Tardío nivel	Alto nivel	Tardío Alto nivel	LPS		
5	•SMI línea de costa hacia la cuenca	Inicial	Transgresivo	Transgresivo			Regresivo
4	•ST línea de costa hacia tierra	Transgresivo	Bajo nivel 2	lowstand prograding wedge			Transgresivo
3	•Hipotética línea tiempo del nivel de base	Bajo nivel	Bajo nivel 1	LS			LS
2	•SOT Exposición del borde de la plataforma	LS	Bajo nivel 1				Transgresivo
1	•Hipotética línea tiempo del nivel de base		LS				LS

Fig. I.1

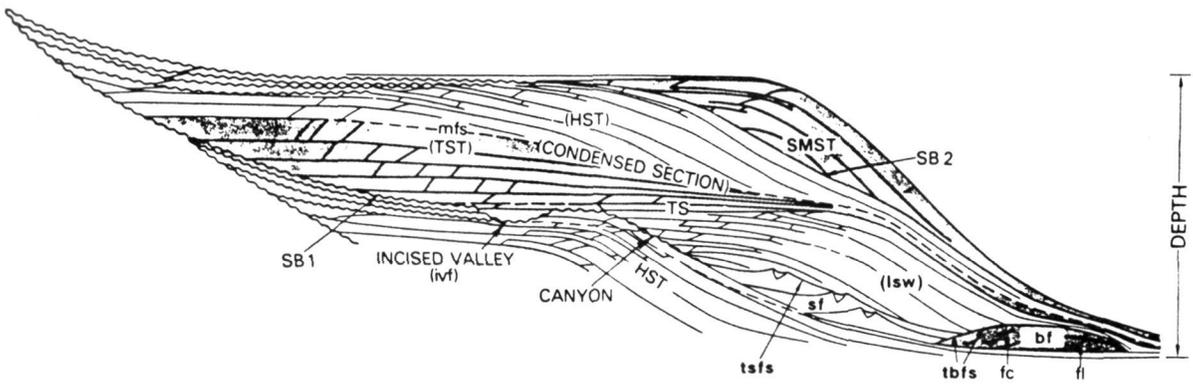
Cada cortejo se interpreta como generado y depositado durante una fase específica o porción de un ciclo completo de bajada-subida eustática del nivel del mar (Vail, 1987; Mitchum y Van Wagoner, 1991). Así, los sistemas turbidíticos del cortejo de nivel del mar bajo se depositarían durante la bajada rápida y el inicio del ascenso; el cortejo progradante en cuña ("lowstand wedge"), durante la parte final de la caída e inicio del ascenso; el cortejo transgresivo durante el ascenso rápido y el cortejo de nivel del mar alto, durante la última parte del ascenso eustático, la inflexión (o momento de estabilidad) y el inicio de una caída eustática (figuras I.1 y I.2).

A lo largo del tiempo, la definición de las secuencias deposicionales de tipo I han sufrido modificaciones, adecuándolas a casos en los que durante la caída del nivel de base la deposición tiene lugar en la zona costera o en la plataforma, dando lugar a regresiones forzadas (Posamentier *et al.*, 1992a y b; Hunt y Tucker, 1992). Este tipo de secuencias son denominadas "de tipo III" por Embry (1994a).

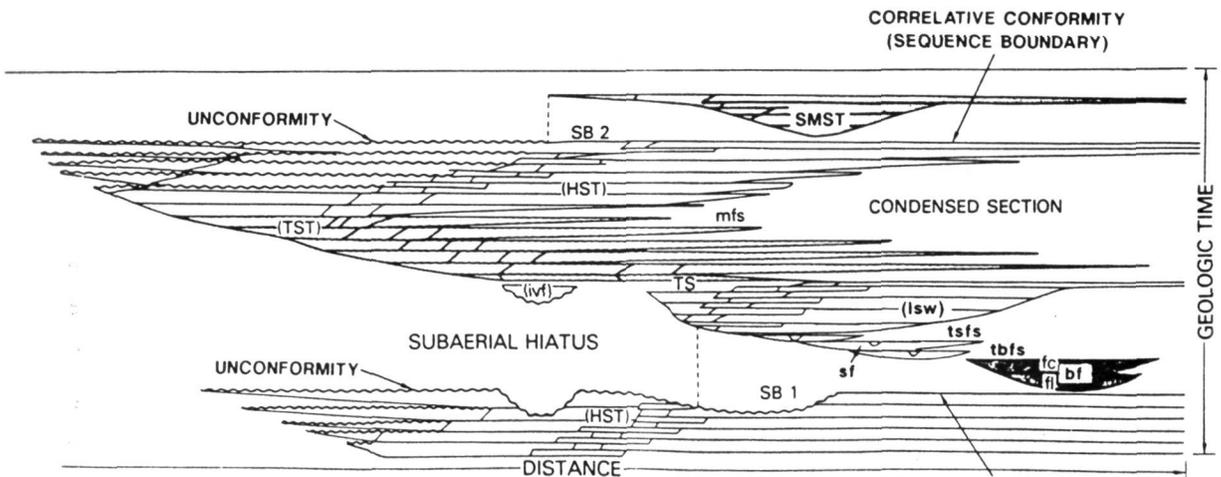
Posamentier *et al.* (1992b) definen las regresiones forzadas ("forced regressions") como la traslación de facies hacia el mar y regresión de la línea de costa en respuesta a un descenso del nivel relativo del mar, independientemente de las variaciones de flujo sedimentario. Los depósitos formados durante una regresión forzada constituyen el "early lowstand systems tract" o cortejo de nivel bajo inicial (figuras I.1 y I.3). Estos depósitos se sitúan sobre una superficie de discordancia que marca un desplazamiento brusco de las facies someras. Esta superficie es considerada por Posamentier *et al.* (1992b) como límite de secuencia de tipo I. Los depósitos de éste cortejo quedan limitados a techo por la superficie transgresiva de erosión costera.

Jervey (1993) define dos partes en el cortejo de nivel del mar bajo, "lowstand 1" y "lowstand 2" (figuras I.1 y I.3). El "lowstand 1" se corresponde con el prisma de depósitos de regresión forzada. Es coincidente en el tiempo con la formación de una discontinuidad de tipo I y se sitúa sobre esta discontinuidad y bajo una de tipo II. El "lowstand 2" se deposita durante el inicio de la consiguiente subida del nivel del mar relativo.

Figura I.2) Esquema ideal de las secuencias deposicionales del grupo Exxon.
Ideal depositional sequences of the Exxon group.

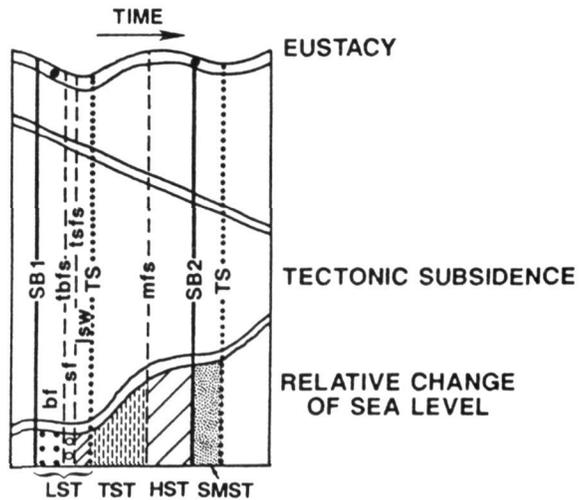


A) IN DEPTH



B) IN GEOLOGIC TIME

- CORTEJO DE BAJO NIVEL DEL MAR (LST)
- Abanico profundo de nivel bajo (bf)
- Abanico de talud de nivel bajo (sf)
- Complejo progradante en cuña de nivel bajo bajo (lsw)
- CORTEJO TRANSGRESIVO (TST)
- CORTEJO DE NIVEL DEL MAR ALTO (HST)
- CORTEJO DE BORDE DE PLATAFORMA (SMST)



(SB) LIMITE DE SECUENCIA

- SB1 " " " de tipo 1
- SB2 " " " de tipo 2

(DLS) SUPERFICIE DE DOWNLAP

- (mfs) Superficie de máxima inundación
- (tbfs) " " techo de abanico profundo de nivel bajo
- (tsfs) " " " " " de talud " " "

(TS) SUPERFICIE TRANSGRESIVA

(ivf) Valle incidido

(fc) canales de abanico

(fl) lóbulos de abanico

Figura 1.3) Secuencias con regresiones forzadas. **a)** Aspecto en el campo. **b)** Corte con la escala vertical exagerada, marcando facies, líneas tiempo y discontinuidades. **c)** Corte con la escala vertical exagerada en el que se diferencian las superficies clave y los cortejos de diferentes autores. **d)** Gráfico espacio/tiempo en el que se contrastan los modelos propuestos por diferentes autores (TST=cortejo transgresivo, T=transgresivo, CON=componentes de "onlap", LST=cortejo de nivel bajo, LPWST=cortejo de cuña progradante de nivel bajo, R=regresivo, COF=componentes de "offlap", ELST=cortejo de nivel bajo temprano, FRWST=cortejo de cuña de regresión forzada, HST=cortejo de nivel alto).

Sequences with forced regression. a) Field view. b) Vertically exaggerated cross-section showing facies, time lines and unconformities. c) Vertically exaggerated cross-section with key surfaces and systems tracts of the different authors. d) Spacetime graph and its relation with the different models (TST=transgressive systems tract, T=transgressive, CON=onlap components, LST=lowstand systems tract, LPWST=lowstand prograding wedge systems tract, R=regressive, COF=offlap components, ELST=early lowstand systems tract, FRWST=forced regression wedge systems tract, HST=highstand systems tract).

Según Vail et al. (1984), Vail (1987) y Van Wagoner et al. (1987) entre otros, las secuencias deposicionales y sus componentes se interpretan como formadas en respuesta a la interacción entre las tasas de eustatismo, subsidencia y aporte sedimentario. Sin embargo, en los modelos propuestos ligan los límites secuenciales a una única causa, como una caída eustática del nivel del mar, ya que asumen tasas constantes de subsidencia y aporte sedimentario.

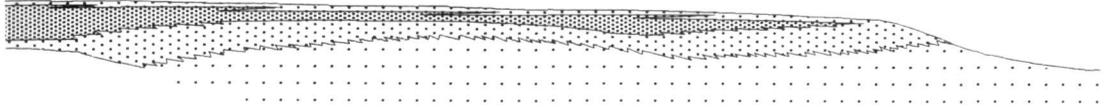
Posamentier y Vail (1988) incluyen factores locales tales como el aporte sedimentario, la fisiografía de la cuenca o la tectónica, como elementos a tener en cuenta a la hora de aplicar los conceptos de la estratigrafía secuencial a zonas concretas.

Posamentier y James (1993) indican que la estratigrafía secuencial hay que tomarla como una herramienta y no como una "plantilla" o esquema rígido, indicando en dicho trabajo que no hay que forzar las observaciones para que encajen en el modelo, sino al revés, modificar el modelo según el caso.

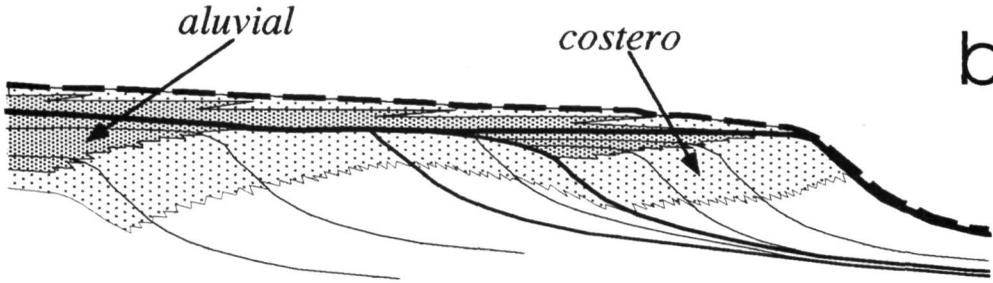
SECUENCIAS REGRESIVO-TRANSGRESIVAS (Secuencias Estratigráficas Genéticas)

Galloway (1989a y b), basándose en las ideas de Frazier (1974), desarrolla la teoría de la estratigrafía genética ("genetic stratigraphy"), subdividiendo las sucesiones sedimentarias en secuencias estratigráficas genéticas ("genetic stratigraphic sequences"). Este tipo de secuencias son acumulaciones sedimentarias que registran un episodio significativo de construcción ("outbuilding") y relleno sedimentario, limitadas por episodios de inundación del margen de la cuenca. De esta manera las secuencias estratigráficas genéticas están limitadas por superficies de máxima inundación que registran el hiato deposicional que se produce sobre la mayor parte de la plataforma transgredida y el talud adyacente durante una inundación marina (Galloway,

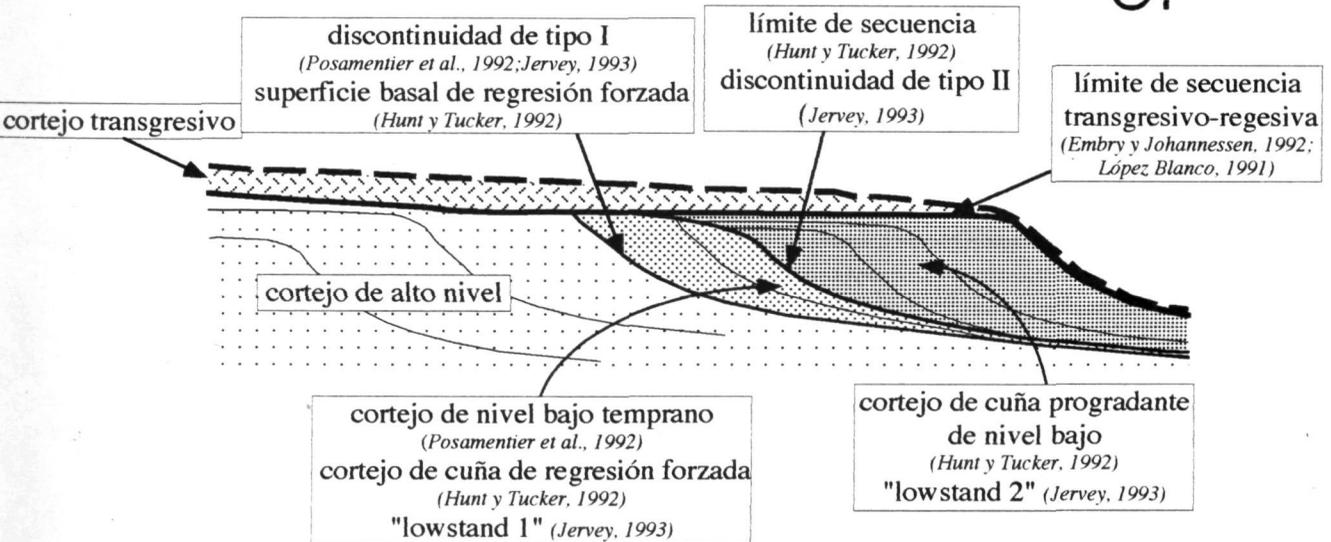
a.



b.



c.



d.

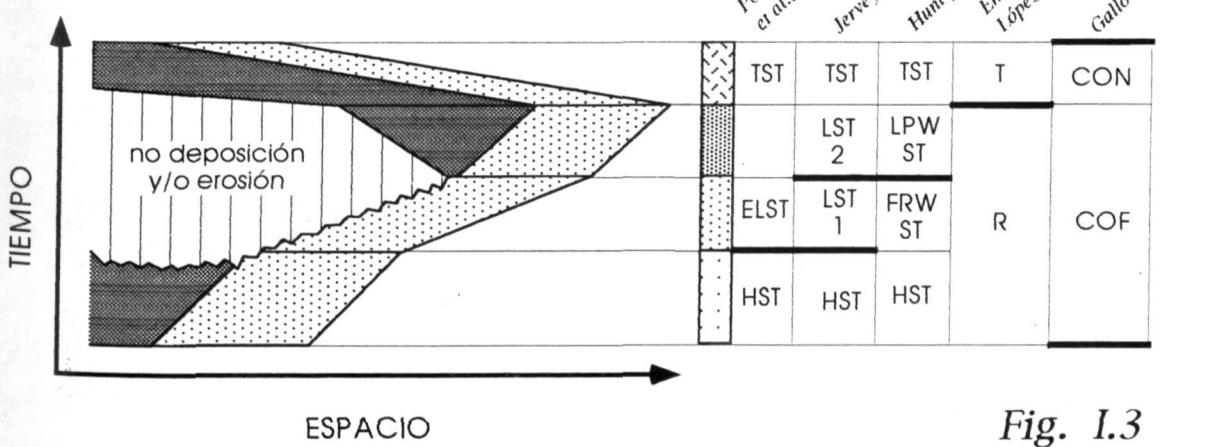


Fig. I.3

1989a). Este tipo de secuencias se subdividen en componentes de "offlap" y componentes de "onlap".

Los componentes de "offlap", según Galloway (1989a), están constituidos por:

- unas facies fluviales y de bahía-lagoon que reflejan la agradación de la llanura costera;
- unos depósitos costeros progradacionales
- un talud agradacional-progradacional.

Los componentes de "onlap" (o transgresivos) están representados por:

- unas facies costeras y de plataforma retrabajadas durante y poco después del retroceso de la línea de costa;
- un "delantal" de facies resedimentadas al pie del talud.

Las superficies limitantes de las secuencias estratigráficas genéticas son superficies de máxima inundación que registran el hiato existente por "la no llegada" de aportes clásticos, ni a la plataforma ni al talud.

Helland-Hansen y Gjelberg (1994) y Helland-Hansen y Martinsen (en prensa) desarrollan una subdivisión del relleno de cuenca basada en los modelos de migración de la línea de costa descritos en términos de trayectorias de la línea de costa (trayectoria de la línea de costa visualizada en un corte paralelo a la pendiente deposicional). Estos autores consideran las superficies de máxima transgresión como las más útiles para la distinción de ciclos. Sin embargo, consideran también útiles las superficies de máxima regresión y de abarrancamiento ("ravinement") para la delineación de ciclos, si esta última se funde con, o erosiona, la discontinuidad subaerea.

SECUENCIAS TRANSGRESIVO-REGRESIVAS

La utilización de ciclos y secuencias de tipo transgresivo regresivo fué inicialmente desarrollada por Johnson *et al.* (1985), y posteriormente por Embry y Johannessen (1992), Embry (1993), Embry (1994a), y por López Blanco (1991), López Blanco (1993), López Blanco *et al.* (1994) y López Blanco y Piña (1995).

Johnson *et al.* (1985) define los ciclos T-R como rocas sedimentarias depositadas durante el tiempo entre el inicio de un evento profundizante y el inicio del próximo evento profundizante de similar escala. Los ciclos T-R de Johnson *et al.* (1985) son atribuidos a un origen eustático debido a su gran continuidad lateral y sincroneidad, lo que implica un origen independiente a las variaciones de subsidencia locales.

Embry y Johannessen (1992), en base a sus trabajos en el Triásico y Jurásico inferior del Artico canadiense, definen las secuencias T-R (transgresivo-regresivas), como aquellas limitadas por discontinuidades subaereas ("subaerial unconformities") asociadas a una "exposición" subaerea y a una superficie regresiva de erosión, formada durante una bajada relativa del nivel del mar (igual que los límites de secuencia adoptados por el grupo Exxon), y que son relevadas hacia la cuenca por superficies transgresivas (que marcan el paso de regresión a transgresión) desarrolladas al inicio del movimiento de la línea de costa hacia tierra (transgresión). Las superficies transgresivas son litológicamente claras, muestran una diacroneidad mínima, se funden con la porción discontinua de los límites de secuencia y son fácil y objetivamente trazables en las zonas transicionales y marinas del sistema.

Estas secuencias T-R contienen una superficie de máxima inundación que sirve para dividir estas secuencias T-R en un cortejo transgresivo ("transgressive systems tract") idéntico al de Posamentier *et al.* (1988) y un cortejo regresivo que comprendería los de nivel alto y bajo. Embry (1993) establece una jerarquía de cinco órdenes de secuencias T-R considerando la naturaleza de los límites de cada secuencia:

- la extensión de la discontinuidad subaerea,
- la extensión del límite de secuencia en la cuenca,
- el diferente grado de deformación sobre y bajo el límite de secuencia,
- la magnitud del episodio de profundización representado por los depósitos transgresivos existentes sobre el límite de secuencia,
- el grado de cambio en el régimen sedimentario y en el estilo de subsidencia sobre y bajo el límite de secuencia.

A partir de los trabajos de campo realizados en una sección de la zona de Sant Llorenç del Munt, López Blanco (1991), define dos tipos de secuencias de diferentes escalas, generalmente limitadas por superficies transgresivas o de máxima regresión (y sus equivalentes laterales). Las de menor escala se denominan "secuencias fundamentales" constituidas generalmente por un tramo transgresivo basal (equivalente al "TST" del grupo Exxon) seguido por un tramo regresivo (equivalente al "HST" y en parte al "LST" del grupo Exxon). En contadas ocasiones se hallan depósitos claramente asimilables a un cortejo de nivel bajo, situándose originalmente el límite de secuencia bajo éstos (cuando se hallan). Posteriormente (López Blanco *et al.*, 1994) optan por la inclusión de los depósitos de nivel bajo dentro del tramo regresivo. Estas secuencias fundamentales son los "fundamental building blocks", equivalentes, en parte, a

las parasecuencias del grupo Exxon. El segundo tipo de secuencias son las "secuencias compuestas" (López Blanco, 1991), secuencias transgresivo-regresivas definidas a partir del apilamiento de las secuencias fundamentales. Las secuencias compuestas están formadas también por una parte transgresiva ("unidad transgresiva") y una parte regresiva ("unidad regresiva") separadas por una superficie de máxima inundación. Tras el estudio del apilamiento de las secuencias compuestas, se definen las "megasecuencias compuestas" (López Blanco y Piña, 1995), también de tipo transgresivo-regresivo y constituidas por una "megaunidad transgresiva" y una "megaunidad regresiva".

El estudio de campo de afloramientos deltaicos presenta un gran interés para la contrastación de las ventajas y desventajas de las diversas metodologías, por dos motivos:

1) Los sistemas deltaicos son sistemas costeros, por lo que las facies que los constituyen están muy influenciadas por las posibles variaciones del nivel de base (factor fundamental para la generación de secuencias de cualquier tipo). Así, los depósitos deltaicos, sobre todo las facies de la franja costera, serán unos excelentes marcadores de cambios del nivel de base.

2) La ventaja de los sistemas deltaicos fósiles con respecto a los actuales es que en los primeros podemos "tocar" los depósitos y observar en una sección, es decir a través del tiempo, la evolución del sistema. En los actuales tenemos una visión en superficie, podemos medir algunos de los parámetros de control, pero para analizar su evolución necesitamos de métodos "indirectos" como la sísmica, sondeos, etc..

El estudio de estos sistemas deltaicos, en afloramientos de calidad, aplicando técnicas de análisis secuencial es útil en tanto que se pueden crear o afinar modelos ya existentes (sedimentarios, estratigráficos o secuenciales) y aplicarlos a escala de rocas almacén.

Mediante la estratigrafía secuencial se pueden llegar a estimar, con mayor o menor precisión, la localización más favorable de rocas susceptibles de constituir reservorios de hidrocarburos u otros fluidos, así como la geometría, volumen y grado de heterogeneidad interna de dichos reservorios.

2) OBJETIVOS

Dentro de la problemática general mencionada en los párrafos precedentes, el presente trabajo se ha planteado los siguientes objetivos:

1) estudiar afloramientos de sucesiones deltaicas que, por su calidad, puedan servir de referencia a estudios de subsuelo, desarrollando la metodología de análisis secuencial más adecuada para la subdivisión de rocas almacén deltaicas.

2) analizar y contrastar los "pros" y "contras" de las diferentes metodologías de análisis secuencial al aplicar estas a contextos tectónicamente activos, tales como las cuencas de antepaís.

3) proponer líneas y pasos futuros a desarrollar en el campo de la investigación de la estratigrafía secuencial.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se han escogido tres zonas de trabajo principales, de gran calidad en cuanto a la extensión areal y continuidad de los afloramientos. Los ejemplos estudiados son:

-el complejo de Sant Llorenç del Munt (dentro del que también se ha englobado el complejo adyacente de Montserrat) de edad Eoceno medio-superior y localizado en el margen SE de la cuenca del Ebro (NE de España).

-el complejo de la Arenisca de Roda, de edad Eoceno inferior, localizado en el margen N de la cuenca de Graus-Tremp (NE de España).

-la cuña arenosa denominada "Panther Tongue", perteneciente a la formación "Star Point" del Cretácico superior del "Western Interior Basin" (Wasatch Plateau y Bookcliffs, Utah, EEUU).

Los ejemplos estudiados se localizan en contextos tectónicamente activos, por lo que, a parte del eustatismo, existirá un importante control sobre la arquitectura deposicional ejercido por la subsidencia y las variaciones en el volumen de aportes .

Los sistemas estudiados afloran en extensiones considerables, de modo que se puede controlar la evolución de los sistemas deltaicos y la continuidad de las secuencias de depósito, tanto en secciones paralelas como perpendiculares al borde de la cuenca. Esta continuidad de los afloramientos también ha permitido correlacionar las subdivisiones estratigráficas efectuadas en los medios deltaicos con depósitos profundos de talud deltaico y con facies proximales subaereas de origen aluvial.

El hecho de estudiar sistemas diferentes, tanto en edad como en el tipo de area fuente, régimen de actividad tectónica sinsedimentaria, dinámica litoral,

etc... permite diferenciar aquellas características arquitecturales más generales o comunes a los sistemas deltaicos, de las que quedan exclusivamente ligadas a las condiciones locales de cada sistema en particular o a un determinado período de tiempo.

3)METODOLOGIA DE TRABAJO

El trabajo realizado durante el desarrollo de esta tesis doctoral consta de dos grandes partes: el trabajo de campo y el de gabinete.

El trabajo de campo se ha basado principalmente en las metodologías clásicas, es decir; cartografía geológica, realización de cortes geológicos, levantamiento de columnas estratigráficas y correlación de las mismas.

En la zona de Sant Llorenç del Munt-Monserrat, el trabajo de campo se basa en una cartografía geológica realizada a escala 1:10.000 (con algunas zonas de detalle a 1:5.000), que abarca cerca de 250 km². También se han realizado 29 columnas estratigráficas que abarcan desde depósitos aluviales proximales hasta marinos de talud de abanico costero. Estas series, que posteriormente se han correlacionado entre si, se han concentrado principalmente en las secuencias de Sant Vicenç y Vilomara.

A partir de los mapas geológicos y los paneles de correlación se ha realizado un corte geológico, (detallando las facies sedimentarias) del sector occidental del sistema de Sant Llorenç del Munt (Serra de l'Obac-Pont de Vilomara) (Anexo I). Este corte se complementa con otros tres cortes geológicos del margen de cuenca, en los que se detalla la estructura de la Cadena Prelitoral.

Como datos de apoyo, de cara a la interpretación de las columnas estratigráficas con predominio de facies aluviales, se ha analizado el porcentaje de cantos, distinguiendo los derivados de la cobertera mesozoica de los derivados del zócalo paleozoico.

También se han realizado contajes en la montaña de Sant Llorenç del Munt (Matadepera-Sant Llorenç, por el "Camí dels Monjos") y a lo largo de la carretera del río Ripoll (kms 10 al 23).

También se ha llevado a cabo un muestreo de cara al estudio palinológico y de arcillas de las secuencias de Sant Vicenç y Vilomara en el corte de la riera de la Santa Creu.

En este trabajo de campo han colaborado en diferente medida Jordi Piña Iglesias, Mariano Marzo, Ivana Salueña Pérez, Pere Busquets Buezo y Juan Peña Gómez.

En la Arenisca de Roda la cartografía se ha realizado a escalas variadas, siempre por encima de 1:25.000. En esta cartografía, a parte de las litofacies, también se han diferenciado las unidades estratigráficas y las estructuras tectónicas que afectan la serie.

El trabajo de campo de esta zona se basa en cerca de 50 columnas estratigráficas principales que sumadas a las accesorias totalizan cerca de un centenar. La correlación de estas columnas estratigráficas se ha realizado en el campo, siguiendo superficies principales y delimitando litosomas de facies similares.

Simultáneamente a la realización de las correlaciones también se han tomado medidas de paleocorrientes (aproximadamente un millar) en toda la extensión de la Arenisca de Roda.

En este trabajo de campo han colaborado Teresa Santaaulària Solans, Annick Chassard, Phillippe Cruymerolle y Mariano Marzo.

En la "Panther Tongue" se han realizado mapas de situación a escala 1:66.000. Una veintena de columnas estratigráficas y su correlación. Paralelamente, en 12 de estas columnas se ha medido la radioactividad natural de las litofacies con un contador de rayos gamma.

En parte de este trabajo de campo han colaborado Janok Battacharya, Julie Kupecz, Karen Loomis y Bill Morris.

El trabajo de gabinete se ha realizado durante y con posterioridad al trabajo de campo. Éste ha consistido principalmente en tareas como: 1) el estudio de bibliografía sobre estratigrafía secuencial, sedimentología y geología de las zonas estudiada; 2) fotointerpretación (tanto de foto area como de fotos tomadas en el campo); 3) dibujo de columnas estratigraficas y realización de paneles de correlación temáticos (litológicos, secuenciales, granulométricos); 4) realización de mapas temáticos (litológicos, estructurales, de isopacas, de paleocorrientes, paleoambientales, de secuencias, paleobiológicos, paleogeográficos...); 5) realización de cortes a partir de las series estratigraficas, paneles de correlación y mapas; 6) análisis de los datos disponibles y elaboración de diagramas de subsidencia; 7) intentos de aplicación de diversos programas de modelización de relleno de cuencas, y finalmente; 8) la redacción de esta tesis doctoral.

4) PRESENTACION DE ESTA MEMORIA

La presente memoria consta de tres partes principales:

- PARTE I: donde se explican los objetivos y la metodología de trabajo realizada.

- PARTE II: donde se presenta la geología regional, el análisis sedimentario y el análisis secuencial de los dos ejemplos de campo estudiados más a fondo (Sant Llorenç del Munt y Roda).

- PARTE III: donde se discuten y contrastan los diferentes modelos de subdivisión secuencial propuestos por las diferentes escuelas y finalmente se exponen las principales conclusiones alcanzadas en este trabajo.

En la Arenisca de Roda la cartografía se ha realizado a escalas variadas, siempre por encima de 1:25.000. En esta cartografía, a parte de las litofacies, también se han diferenciado las unidades estratigráficas y las estructuras tectónicas que afectan la serie.

El trabajo de campo de esta zona se basa en cerca de 50 columnas estratigráficas principales que sumadas a las accesorias totalizan cerca de un centenar. La correlación de estas columnas estratigráficas se ha realizado en el campo, siguiendo superficies principales y delimitando litosomas de facies similares.

Simultáneamente a la realización de las correlaciones también se han tomado medidas de paleocorrientes (aproximadamente un millar) en toda la extensión de la Arenisca de Roda.

En este trabajo de campo han colaborado Teresa Santaèulària Solans, Annick Chassard, Phillippe Cruymerolle y Mariano Marzo.

En la "Panther Tongue" se han realizado mapas de situación a escala 1:66.000. Una veintena de columnas estratigráficas y su correlación. Paralelamente, en 12 de estas columnas se ha medido la radioactividad natural de las litofacies con un contador de rayos gamma.

En parte de este trabajo de campo han colaborado Janok Battacharya, Julie Kupez, Karen Loomis y Bill Morris.

El trabajo de gabinete se ha realizado durante y con posterioridad al trabajo de campo. Éste ha consistido principalmente en tareas como: 1) el estudio de bibliografía sobre estratigrafía secuencial, sedimentología y geología de las zonas estudiada; 2) fotointerpretación (tanto de foto area como de fotos tomadas en el campo); 3) dibujo de columnas estratigraficas y realización de paneles de correlación temáticos (litológicos, secuenciales, granulométricos); 4) realización de mapas temáticos (litológicos, estructurales, de isopacas, de paleocorrientes, paleoambientales, de secuencias, paleobiológicos, paleogeográficos...); 5) realización de cortes a partir de las series estratigraficas, paneles de correlación y mapas; 6) análisis de los datos disponibles y elaboración de diagramas de subsidencia; 7) intentos de aplicación de diversos programas de modelización de relleno de cuencas, y finalmente; 8) la redacción de esta tesis doctoral.

4) PRESENTACION DE ESTA MEMORIA

La presente memoria consta de tres partes principales:

- PARTE I: donde se explican los objetivos y la metodología de trabajo realizada.

- PARTE II: donde se presenta la geología regional, el análisis sedimentario y el análisis secuencial de los dos ejemplos de campo estudiados más a fondo (Sant Llorenç del Munt y Roda).

- PARTE III: donde se discuten y contrastan los diferentes modelos de subdivisión secuencial propuestos por las diferentes escuelas y finalmente se exponen las principales conclusiones alcanzadas en este trabajo.